doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.09.009

多模态振动下木薯-土壤复合体分离机理与降耗研究

刘婉茹[1,2]　张　健[1,2]　吴敏生[2,3]　查显涛[2,3]　潘永菲[2,3]　潘志国[4]

(1.海南大学南繁学院(三亚南繁研究院),三亚 572000;2.海南大学机电工程学院,海口 570100;
3.农业农村部热带智能农业装备重点实验室,儋州 571700;
4.青岛农业大学机电工程学院,青岛 266019)

摘要:针对木薯收获过程中土壤破碎质量差、薯土分离能耗高等问题,引入非线性累积冲击损伤系数,建立木薯-土壤复合体累积冲击能量耗散模型,通过物理试验与仿真模拟,对比了稳态正弦、线性扫频与对数扫频 3 种振动模式下土壤颗粒空间轨迹偏移量(S_t)、薯土分离率(Q_{cs})及单位分离比能(E_{SR})的影响规律,揭示了土壤空间运移特性与能量耗散机制。结果表明,木薯压缩与土壤锥入仿真与物理试验相对误差分别为 0.98% 与 0.21%。3 种振动模态下,S_t与 Q_{cs}均呈正相关关系;线性扫频与对数扫频激励模式下,扫频范围对 Q_{cs}与 E_{SR}影响均显著。其中,6 Hz、15 mm 稳态正弦激励模式下,薯土分离率较优,为 89.50%,单位分离比能为 0.32 J/%;起始频率 3 Hz、终止频率 9 Hz、振幅 15 mm 的线性扫频激励模式下,薯土分离率较优,为 76.75%,单位分离比能为 0.37 J/%;起始频率 6 Hz、终止频率 9 Hz、振幅 12.5 mm 的对数扫频激励模式下,薯土分离率较优,为 83.92%,单位分离比能为 0.46 J/%。研究完善了木薯-土壤-振动模态间的互作理论,为低能耗木薯收获装备开发提供了理论依据与参数指导。

关键词:木薯-土壤复合体;多模态振动;薯土分离;离散元;非线性累积冲击损伤系数

中图分类号:S225.7　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)09-0093-12　　**OSID**:

Separation Mechanism and Energy Consumption Optimization of Cassava – Soil Composite under Multimodal Vibration

LIU Wanru[1,2]　ZHANG Jian[1,2]　WU Minsheng[2,3]　ZHA Xiantao[2,3]　PAN Yongfei[2,3]　PAN Zhiguo[4]

(1. *School of Breeding and Multiplication (Sanya Institute of Breeding and Multiplication), Hainan University, Sanya* 572000, *China*
2. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou* 570100, *China*
3. *Key Laboratory of Tropical Intelligent Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Danzhou* 571700, *China*
4. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao* 266019, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of poor soil fragmentation quality and high energy consumption in cassava harvesting, a cumulative impact energy dissipation model of cassava – soil complex was established. By integrating physical experiments with simulation modeling, a high-precision cassava – soil composite model was established. The effects of three vibration modes-steady-state sinusoidal, linear frequency sweep, and logarithmic frequency sweep-on soil particle spatial trajectory displacement (S_t), cassava-soil separation rate (Q_{cs}), and energy consumption per unit separation rate (E_{SR}) were compared, revealing the spatial movement characteristics of soil and the underlying energy dissipation mechanisms. Results showed that the relative errors between simulation and physical tests were 0.98% for cassava compression and 0.21% for soil cone penetration. Under all three vibration modes, S_t was positively correlated with Q_{cs}, with the strongest correlation observed under steady-state sinusoidal excitation. In linear and logarithmic sweep frequency modes, the sweep range had no significant effect on S_t but significantly influenced both Q_{cs} and E_{SR}. Notably, steady-state sinusoidal excitation performed best at 6 Hz and 15 mm, achieving Q_{cs} of 89.50% while maintaining E_{SR} at a relatively low level of 0.32 J/%; for linear sweep frequency excitation, the optimal parameters were a starting frequency of 3 Hz, ending frequency of 9 Hz, and amplitude of 15 mm, yielding Q_{cs} of 76.75% and E_{SR} of 0.37 J/%; logarithmic

收稿日期:2026-02-08　修回日期:2026-02-13

基金项目:国家自然科学基金项目(52265029)

作者简介:刘婉茹(1993—),女,博士后,主要从事农业机械设计理论与方法研究,E-mail:997309@hainanu.edu.cn

通信作者:查显涛(1989—),男,副教授,博士,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail:zhaxt@hainanu.edu.cn

sweep frequency excitation performed optimally at a starting frequency of 6 Hz, ending frequency of 9 Hz, and amplitude of 12.5 mm, achieving Q_{cs} of 83.92% and E_{SR} of 0.46 J/%. The research refined the interaction theory among cassava, soil and vibration modes, providing theoretical basis and parameter guidance for the development of low-energy cassava harvesting equipment.

Key words: cassava - soil composite; multi-modal vibration; cassava - soil separation; discrete element method; nonlinear cumulative impact damage coefficient

0 引言

木薯是我国热区重要粮饲兼用及能源作物,节能低损收获是产业发展的关键环节,传统木薯收获方式存在土壤黏附严重、木薯-土壤分离能耗高等问题[1],严重制约了生产效率和经济效益。

振动分离技术通过向土壤施加周期性激励[2],促使土壤结构松散、界面黏附失效,是实现高效薯土分离的有效途径。目前,振动分离相关研究重点集中在以下方面:通过仿生学或几何形状优化对铲体结构进行创新设计,以降低作业阻力,如设计双圆盘铲、仿生切削齿等[3-4];振动参数的系统优化,聚焦于频率、振幅、振动方向等关键参数,以寻求最佳薯土分离效果[5];引入超声波振动辅助切割技术,研究证实高频微幅振动可有效降低土壤黏附与切削阻力[6];数值模拟方法的探索应用,基于离散元法(DEM)可从微观颗粒尺度模拟土壤在振动载荷下的流动、破碎及其与装备间的互作机理[7],为结构设计提供了理论依据。

当前振动式木薯收获装备仍面临能量利用率偏低与田间土壤条件适应性不足等核心挑战[8-9],根本原因在于木薯块根呈放射状多条径向扩展空间分布特征,在生长过程中,块根与土壤紧密黏附、裹挟,形成力学性质独特的“木薯-土壤复合体”结构(简称薯土复合体),现有研究对振动激励模式、振动参数、薯土复合体动态响应间的复杂耦合关系缺乏系统性揭示,致使木薯收获装备的振动参数多依赖于田间经验试错。土壤-块茎的振动分离研究也多集中于单一频率的稳态正弦激励[10-11],缺乏对线性扫频、对数扫频等激励模式的系统对比与效能评估,木薯-土壤间高分离效率往往伴随高能量消耗,导致分离性能与能耗经济性难以协同优化。

本文运用物理试验与离散元仿真相结合的方法,系统研究薯土复合体在多模态振动激励下的分离过程。研究旨在建立并标定高精度木薯与土壤离散元模型;对比分析稳态正弦、线性扫频、对数扫频3种振动模式下的土壤颗粒空间移动规律及薯土分离效果,揭示薯-土能量传递与耗散特性的差异机制,提出兼顾分离效率与能耗成本的最优振动策略,为低能耗木薯收获装备研发提供指导。

1 薯土复合体累积冲击能量耗散模型

薯土分离的核心机制在于振动部件对薯土复合体施加周期激振,解构土壤颗粒间的黏附力。该过程本质是能量输入、传递、耗散与损伤累积的动态演化过程[12]。振动部件提供输入能量 E_{in},但 E_{in} 中仅有一部分被薯土复合体吸收并用于土壤破碎及薯-土界面分离,其余部分则用于弹性变形、热耗散等过程[13]。引入碰撞能量比 e 来量化能量分配,为薯土复合体用于分离的能量占总输入能量的比例,表达式为

$$e = \frac{1}{1 + \dfrac{k_p}{k_s}} \tag{1}$$

式中 k_p——土壤颗粒刚度,N/m

k_s——接触材料刚度,N/m

用于土壤颗粒破碎、裂纹扩展及木薯-土壤界面剥离的有效冲击能量 E_{ef} 计算式为

$$E_{ef} = eE_{\text{in}} \tag{2}$$

当单次冲击能量 E_{ef} 小于薯土复合体分离所需临界能量时,复合体不破碎;但重复冲击会导致内部微裂纹逐步扩展[14],土壤损伤不断累积[15],最终使木薯-土壤界面或土壤自身的强度下降直至破坏。

薯土复合体分离所需最小能量为 E_n,每次冲击后,由于内部损伤积累,断裂能逐渐下降。第 n 次冲击的耗散能为 D_n,其物理意义是有效冲击能量转化为损伤耗散能量的比例,反映了薯土复合体随冲击次数增加的损伤敏感性,耗散能 D_n 满足公式

$$D_n = E_n - E_{n+1} \tag{3}$$

式中 E_{n+1}——施加冲击力之后复合体断裂能

由公式(3)可知,D_n 反映了薯土复合体的破坏程度,D_n 越大,断裂能衰减越显著,复合体越接近破碎临界状态。D_n 与 E_{ef} 成正比,与接触材料有关。为此,引入非线性累积冲击损伤系数 γ($\gamma \in [0,1]$),以表征薯土复合体损伤性能随累积冲击衰减的程度[16]。

$$D_n = \left(\frac{2\gamma}{2\gamma - 5D_n + 5}\frac{eE_{\text{in}}}{E_n}\right)^{\frac{2\gamma}{5}} = \gamma e E_{\text{in}} \tag{4}$$

$$\gamma = \frac{5D_n}{2\dfrac{eE_{\text{in}}}{E_n} - 2D_n \ln D_n} \tag{5}$$

结合公式(2)、(4)、(5)，可以得到断裂能随冲击次数 n 的衰减规律

$$E_{n+1}=E_n-\frac{5D_n}{2\dfrac{eE_{in}}{E_n}-2D_n\ln D_n}eE_{in} \tag{6}$$

薯土复合体初始断裂能为 E_0，临界断裂能为 E_{cf}（当断裂能高于临界值时，复合体发生宏观分离），薯土复合体解离所需理论临界冲击次数 N_{cr} 为

$$N_{cr}=\frac{E_0-E_{cf}}{\gamma eE_{in}} \tag{7}$$

薯土复合体分离所需的累积冲击能量 W_{cu} 为

$$W_{cu}=N_{cr}E_{in}=\frac{E_0-E_{cf}}{\gamma e}=\frac{2\left(\dfrac{eE_{in}}{E_n}-D_n\ln D_n\right)}{5D_ne(E_0-E_{cf})} \tag{8}$$

由公式(8)发现，能量耗散过程差异在于输入能量 E_{in} 的时变性及累积损伤系数 γ 的变化。且输入能量 E_{in} 的时变特性直接影响有效冲击能量 E_{cf} 的传递效率与损伤系数 γ 的演化行为。通过累积冲击能量耗散模型可知，薯土复合体的分离并非依赖单次高强度冲击，而是低能量多次冲击、损伤累积、断裂能衰减，最终实现宏观破碎的渐进式过程。

2　多模态振动测试平台搭建

2.1　测试平台搭建

为了探究多振动模态对薯土分离过程中能量耗散规律与分离效率的影响，搭建累积冲击振动测试平台，如图 1 所示，主要由控制系统、测量系统与执行部件 3 部分构成。试验时，由 DH1301N 扫频信号发生器产生激励信号，经 DH5872 功率放大器放大后驱动激振器，使激振板产生特定频率与振幅的振动，冲击能量以应力波形式通过激振板（尺寸 1 200 mm × 1 200 mm × 2 mm）传递至薯土复合体，使其产生受迫振动。信号发生器可输出频率为 0.1 ~ 10 kHz、幅值为 0.01 ~ 10 V 的稳态正弦、线性扫频和对数扫频信号，通过 FASTCAM MH6 型高速摄影系统记录木薯-土壤分离过程。

引入频率随时间变化曲线 $f(t)$，定义了 3 种振动模态：稳态正弦激励、线性扫频激励和对数扫频激励。其中，稳态正弦激励的位移-时间曲线是一条光滑、周期重复的正弦曲线[17]，振幅和频率在整个激励过程中保持恒定，即

$$f(t)=f_0 \tag{9}$$

式中　f_0——起始频率，Hz

线性扫频激励施加的是频率随时间线性增加的正弦信号，振幅保持恒定，即

$$f(t)=f_0+(f_1-f_0)\frac{t}{T} \tag{10}$$



图 1　多模态振动测试平台

Fig. 1　Multi-modal vibration test platform

式中　f_1——终止频率，Hz

t——扫频激励的时刻，s

T——扫频总时长，s

对数扫频激励的频率随时间呈指数增长，即

$$f(t)=f_0\left(\frac{f_1}{f_0}\right)^{\frac{t}{T}} \tag{11}$$

2.2　薯土复合体样本制备

海南省儋州市是我国木薯主产区，采集“华南 9 号”品种健康木薯，以及 0 ~ 30 cm 深度的原位耕作层土壤。定制了内部尺寸（长 × 宽 × 高）为 800 mm × 800 mm × 350 mm 的试验箱，四周箱板为可拆卸式，便于后期薯土复合体取样。土壤样本经自然风干后，过 2 mm 标准筛去除杂质与粗大团聚体，依据木薯生长土壤质地[18-19]，按黏粒（0 ~ 0.002 mm）、粉粒（0.002 ~ 0.02 mm）与砂粒（0.02 ~ 2 mm）质量比为 6∶2∶2进行人工复配，确保质地均匀。

试样制备时，在箱底铺设 5 cm 厚的土层，将土壤压实至田间状态下的容重（约 1.35 g/cm^3）。将木薯块茎置于箱体中心，分层填入土壤，每层均压实直至填满箱体。为减少重塑土结构扰动，试样置于控温实验室（25 ± 2）℃ 中固化 60 d。期间定量浇水，固化结束后，拆除箱体四周的侧板，完成木薯-土壤复合体原状试样的制备，如图 2 所示。采用 SDH - 1202 快速卤素水分测定仪（烘干温度 105℃，水分含量误差 ±1%）测定土壤含水率，测得试样平均含水率为 22.39%（符合木薯收获期田间土壤水分含量）。本研究共制备 9 个薯土复合体试样，随机分为 3 组（每组重复 3 次），所有试样在试验前均统一测定基础理化性质，确保组间一致性。

3　木薯-土壤复合体离散元模型标定

3.1　木薯离散元模型建立与压缩试验

采用 SHINING 3D EinScan - Pro 多功能手持式三维扫描仪获取木薯表面点云数据。利用 Geomagic Wrap 2021 软件进行逆向工程处理：先剔

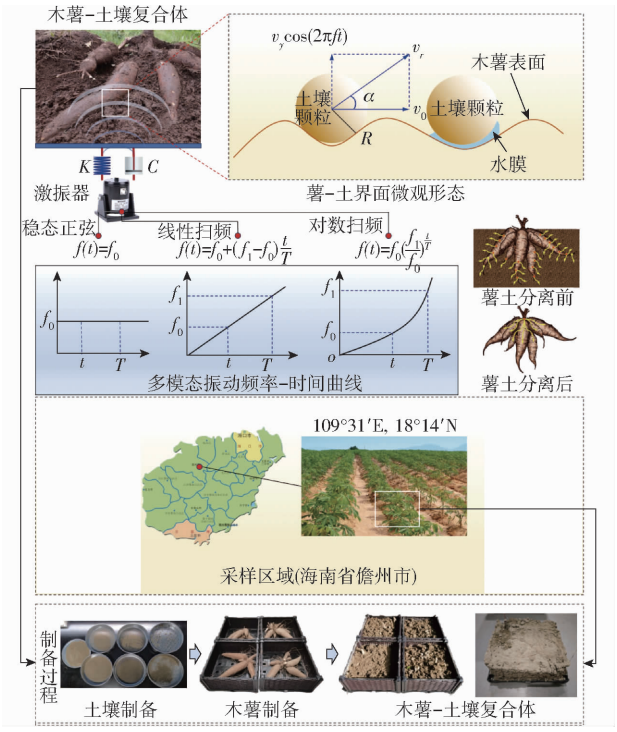

图 2 薯土复合体样本制备及累积冲击作用下的分离特性

Fig. 2 Preparation process of cassava - soil composite and its separation characteristics under cumulative impact action

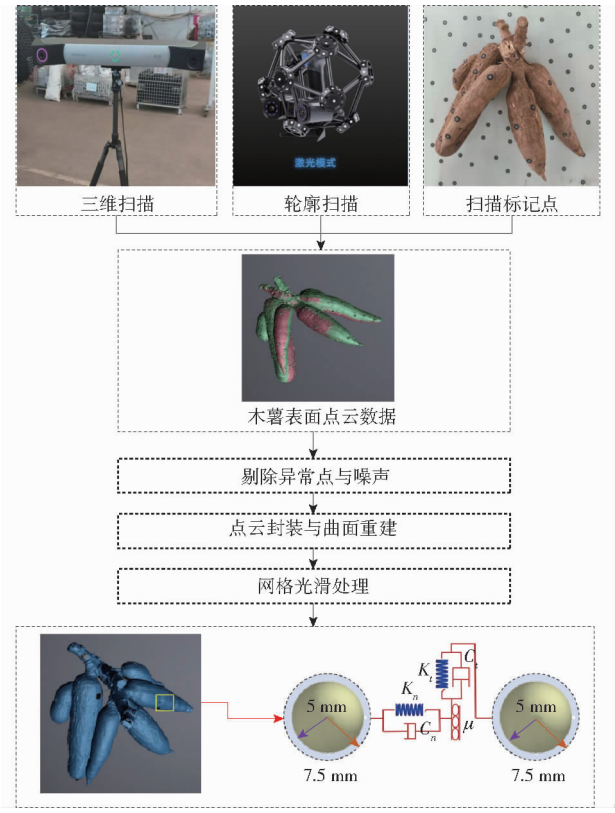

图 3 木薯离散元模型构建方法

Fig. 3 Establishment method of discrete element model for cassava

除异常点与噪声,进行点云封装与曲面重建,经裁剪、钉状物删除、合并、松弛及光顺等步骤,最终得到几何特征保留完好的木薯多边形三维模型,如图 3 所示。

将三维模型导入离散元软件 EDEM 2022 中,采用半径 5.0 mm 的单球形颗粒对木薯进行填充,在颗粒间引入 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型,以模拟木薯内部的粘结特性。参照相关研究结果[20],接触半径范围为 7.5 mm,设置法向与切向粘结刚度(S_n,S_i)、法向与切向临界应力($\sigma_{\max}$,$\tau_{\max}$)等关键参数。该模型能有效模拟木薯在受力时从粘结状态到断裂破坏的动态过程。

木薯颗粒由粘结到失效破坏的过程模型为

$$\begin{cases}\Delta F_\delta = -v_n S_n A_s \Delta t\\ \Delta F_\alpha = -v_t S_i A_s \Delta t\\ \Delta T_n = -\omega_n S_n J \Delta t\\ \Delta T_t = -\omega_t S_i J \Delta t\end{cases} \tag{12}$$

其中

$$J=\frac{1}{2}\pi R_B^4 \tag{13}$$

$$A_s=\pi R_B^2 \tag{14}$$

式中 ΔF_δ——法向粘结力增量,N

ΔF_α——切向粘结力增量,N

ΔT_n——法向粘结力矩,N·m

ΔT_t——切向粘结力矩,N·m

v_n——颗粒法向速度,m/s

v_t——颗粒切向速度,m/s

ω_n——法向角速度,rad/s

ω_t——切向角速度,rad/s

A_s——接触区域面积,m^2

Δt——时间步长,s

J——平行粘结键惯性矩

R_B——粘结半径,mm

粘结键的断裂条件为

$$\begin{cases}\sigma_{\max} < \dfrac{-F_\delta}{A_s}+\dfrac{2T_t}{J}R_B\\ \tau_{\max} < \dfrac{-F_\alpha}{A_s}+\dfrac{2T_n}{J}R_B\end{cases} \tag{15}$$

为了校准木薯离散元模型参数,开展压缩试验,如图 4 所示。物理试验中,制备尺寸为 300 mm × 300 mm × 300 mm 的立方体试样,使用万能材料试验机(型号 SHK - A107,额定载荷 500 kg,上海恒克仪器科技有限公司)以恒定速度 5 mm/s 进行静态压缩,直至试样发生明显破坏,同步采集载荷位移曲线,数据采集间隔为 0.02 s。

在仿真中,建立与物理试验几何尺寸完全一致的木薯离散元模型,以相同速度(5 mm/s)驱动压头进行压缩模拟。由公式(12)~(15)可知,需要校准的参数有法向粘结刚度 S_n、切向粘结刚度 S_i、法向

临界应力 σ_{max}、切向临界应力 τ_{max}。开展 Box - Behnken Design 响应面试验，使仿真试验的载荷位移曲线与物理试验高度吻合，从而确保模型能准确反映真实木薯的宏观力学行为。

3.2　土壤离散元模型建立与锥入试验

为校准土壤离散元模型参数，采用 LP - 100D 型液塑限联合测定仪开展土壤锥入试验[20]，如图 4 所示，锥体质量为 76 g、锥角为 30°。盛土杯内径 50 mm、高度 40 mm。将制备的 120 g 土壤样本均匀填入杯中并刮平表面。释放锥体，使其在重力作用下自由、垂直贯入土壤，静置 5 s 后读取锥入深度。

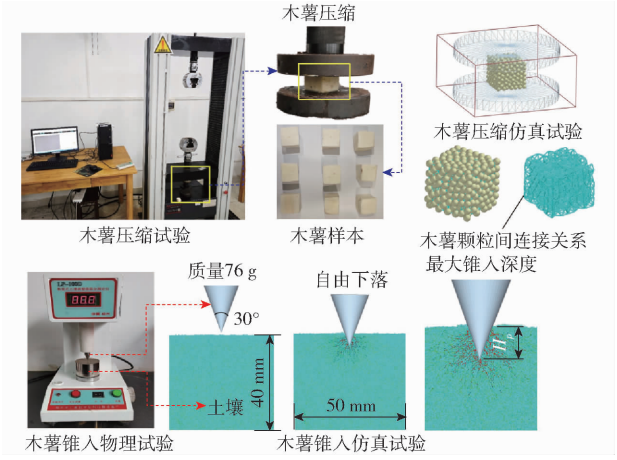

图 4　木薯和土壤仿真参数标定过程

Fig. 4　Calibration process of cassava and soil discrete element model parameters

在 EDEM 软件中，建立与物理试验尺寸完全一致的锥体与盛土杯仿真模型，并通过与多体动力学软件 RecurDyn 耦合实现锥体的自由下落。根据前期土壤组成分析结果，将土壤颗粒按质地划分为砂粒（半径 2.0 mm）、粉粒（半径 1.0 mm）和黏粒（半径 0.5 mm）3 类，并按质量比 6∶2∶2 进行配比，以复现田间实际土体组成。调整土壤颗粒间 Hertz - Mindlin with JKR 接触模型中的表面能参数，使仿真中的锥入深度与物理试验结果吻合，确定最优土壤接触参数。

3.3　木薯-土壤复合体离散元模型建立

为了探究能量在土壤介质中的传播行为及薯土界面分离微观动力学机制，建立木薯-土壤复合体的离散元模型。在 EDEM 中建立长 × 宽 × 高为 800 mm × 800 mm × 350 mm 的立方体土壤箱，在土壤箱内生成 5 cm 厚土层后，通过颗粒工厂生成木薯离散元模型。在土壤颗粒之间以及木薯与土壤颗粒之间均采用 Hertz - Mindlin with JKR 接触模型[21]，模拟湿润条件下土壤的黏附行为。该模型通过表面能（λ）表征由水分、静电等效引起的颗粒间黏附力，基于上述模型，最终建立的薯土复合体离散元模型如图 5 所示，其中 F_{ss} 表示土壤颗粒间的黏附力，F_{cs} 表示木薯土壤界面颗粒间的黏附力。

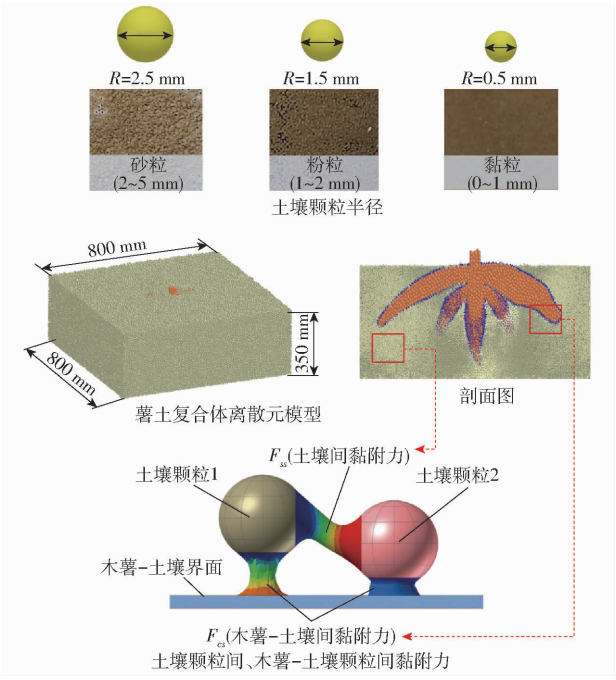

图 5　薯土复合体离散元模型

Fig. 5　Discrete element model of cassava - soil composite

法向弹性接触力 F_{JKR} 计算式为

$$F_{JKR} = -4\sqrt{\pi\lambda E^*}\alpha^{\frac{3}{2}} + \frac{4E^*}{3R^*}\alpha^3 \tag{16}$$

式中　α——颗粒间法向重叠量，mm

E^*——等效弹性模量，Pa

R^*——等效接触半径，mm

等效弹性模量 E^*、等效接触半径 R^* 计算式为

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-U_1^2}{E_1} + \frac{1-U_2^2}{E_2} \tag{17}$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \tag{18}$$

式中　E_1、E_2——接触颗粒弹性模量，Pa

U_1、U_2——接触颗粒泊松比

R_1、R_2——颗粒接触半径，m

3.4　模型参数校准结果

木薯压缩试验中，以物理试验与仿真模拟获取的最大轴向载荷相对误差 $\Delta\delta$ 为试验指标，有

$$\Delta\delta = \left|\frac{\delta_i - \delta_j}{\delta_i}\right| \times 100\% \tag{19}$$

式中　δ_i——台架试验轴向最大压缩载荷，N

δ_j——仿真试验轴向最大压缩载荷，N

10 组物理压缩试验测得最大压缩载荷分别为 952.37、1 031.58、987.26、945.19、1 022.84、994.05、945.71、1 054.32、981.69、989.99 N，平均值为 990.50 N，该值为仿真模型参数校准的目标载荷。

方差分析表明(表 1,x_1、x_2、x_3、x_4 为 S_n、S_i、σ_{max}、τ_{max}的编码值),模型显著($P<0.05$),未出现失拟,拟合效果较好。σ_{max}与 τ_{max}对最大压缩载荷的影响极显著($P<0.01$),S_i的影响显著($P<0.05$)。以目标载荷 990.50 N 为优化目标进行参数寻优,各因子最优编码值为:$x_1=0.736$,$x_2=0.811$,$x_3=-0.510$,$x_4=-0.288$。校准参数值为:$S_n=8.416\times10^7$ N/m,$S_i=8.866\times10^7$ N/m,$\sigma_{max}=1.094\times10^8$ Pa,$\tau_{max}=1.227\times10^8$ Pa。

表 1 木薯最大压缩载荷方差分析

Tab.1 Analysis of variance (ANOVA) of maximum compression load of cassava

来源	平方和	自由度	均方和	F	P
模型	2.366×10^5	10	23 664.87	8.09	0.000 4 **
x_1	2 119.76	1	2 119.76	0.725 0	0.409 9
x_2	15 776.00	1	15 776.00	5.40	0.037 1 *
x_3	75 954.34	1	75 954.34	25.98	0.000 2 **
x_4	1.241×10^5	1	1.241×10^5	42.44	<0.000 1 **
x_1x_2	895.51	1	895.51	0.306 3	0.589 4
x_1x_3	25.25	1	25.25	0.008 6	0.927 4
x_1x_4	2 001.22	1	2 001.22	0.684 5	0.423 0
x_2x_3	12 658.50	1	12 658.50	4.33	0.057 8
x_2x_4	94.77	1	94.77	0.032 4	0.859 9
x_3x_4	3 031.05	1	3 031.05	1.04	0.327 2
残差	38 009.43	13	2 923.80		
总和	2.747×10^5	23			

注:* 表示影响显著($0.01\leqslant P<0.05$);** 表示影响极显著($P<0.01$)。下同。

仿真试验结果表明木薯平均最大压缩载荷为 980.7 N,与物理试验相对误差为 0.98%,表明建立的木薯离散元模型具有较高的精度。图 6 对比了物理与仿真模拟的载荷-时间曲线,二者变化趋势吻合较好。对弹性变形阶段(10~30 s)进行线性拟合,物理试验拟合曲线斜率 $S_p=26.89$,$R_p^2=0.992\,3$;仿真试验拟合曲线斜率 $S_s=29.07$,$R_s^2=0.965\,2$。斜率相对误差为 7.50%,说明模型在模拟压缩过程中的力学响应行为能够较好地反映物理过程。

土壤锥入试验中,以物理试验与仿真试验获取的锥入深度相对误差 $\Delta\psi$ 作为试验指标,有

$$\Delta\psi=\left|\frac{\psi_i-\psi_j}{\psi_i}\right|\times100\% \tag{20}$$

式中 ψ_i——台架试验锥入深度,mm

ψ_j——仿真试验锥入深度,mm

10 组锥入试验测量深度分别为 8.96、9.45、9.12、9.87、9.65、9.33、9.58、8.84、9.71、9.79 mm,平均值为 9.33 mm,该值为参数校准目标值。结果表明,当 $\gamma=12.50$ J/m^3 时,仿真锥入深度为 9.35 mm,与物理试验平均值(9.33 mm)相对误差 $\Delta\psi$ 最小,仅为 0.21%。表明土壤离散元模型符合真实土壤在静态贯入下的力学响应,具有较高的精度与可靠性。

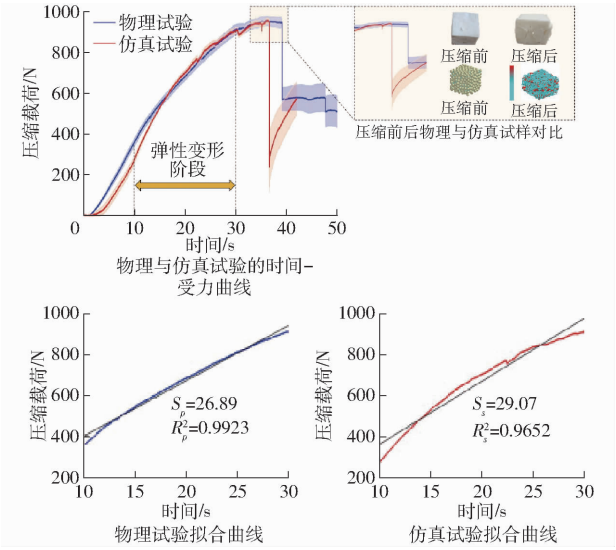

图 6 木薯离散元参数标定

Fig.6 Calibration of cassava discrete element parameters

4 多模态振动下仿真试验与台架试验验证

4.1 试验指标

为定量描述多模态振动下土壤颗粒运移特性,从 EDEM 后处理提取 10 组土壤颗粒的初始与终止位置坐标,计算土壤颗粒的三维欧氏距离,定义空间轨迹偏移量 S_t 为

$$S_t=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sqrt{(S_x-S_{x0})^2+(S_y-S_{y0})^2+(S_z-S_{z0})^2}}{n} \tag{21}$$

式中 (S_{x0},S_{y0},S_{z0})——颗粒初始位置坐标,mm

(S_x,S_y,S_z)——颗粒终止位置坐标,mm

n——选取的土壤颗粒数量($n=10$)

薯土分离率 Q_{cs} 为

$$Q_{cs}=\frac{m_s}{M-m_1}\times100\% \tag{22}$$

式中 m_s——脱落的土壤质量,kg

M——薯土复合体总质量,kg

m_1——木薯质量,kg

为评价分离能量利用效率,定义单位分离率所消耗的能量为分离比能 E_{SR}。稳态正弦激励下有

$$E_{SR}=\frac{E_{in}}{Q_{cs}}=\frac{2\pi^2m_0f_d^3A^2T}{\frac{m_s}{M-m_1}} \tag{23}$$

线性扫频激励下有

$$E_{SR}=\frac{E_{\text{in}}}{Q_{cs}}=\frac{2\pi^2 m_0 A^2\int_0^T f^3(t)\,\mathrm{d}t}{\frac{m_s}{M-m_1}} \tag{24}$$

对数扫频激励下有

$$E_{SR}=\frac{E_{\text{in}}}{Q_{cs}}=\frac{2\pi^2 m_0 A^2\frac{T(f_1^3-f_0^3)}{3\ln\left(\frac{f_1}{f_0}\right)}}{\frac{m_s}{M-m_1}} \tag{25}$$

试验独立重复 3 次，利用方差分析（ANOVA）检验各因素对 S_t、Q_{cs} 和 E_{SR} 的影响（$0.01<P\leqslant 0.05$ 显著，$P\leqslant 0.01$ 极显著），采用 Origin 2022 进行数据统计分析。

4.2　振动模式及参数对 S_t、E_{avg} 影响显著性分析

4.2.1　稳态正弦激励

由表 2 可知，当振幅一定时（如 10 mm），频率从 3 Hz 提升至 9 Hz，S_t 从 62.37 cm 增加至 116.99 cm，Q_{cs} 从 27.01% 提高至 89.37%。S_t 与 Q_{cs} 随频率和振幅的增加而增长，表明增强土壤的宏观运动是提升分离效率的直接物理机制。方差分析结果表明（表 3），振频对 S_t、Q_{cs} 及 E_{SR} 均具有极显著影响，频率是调控土壤运动状态、分离效率和能耗的关键参数。当振幅为 15 mm、频率从 6 Hz 增至 9 Hz 时，Q_{cs} 从 89.50% 提升至 99.50%，但 E_{SR} 却从 0.32 J/% 急剧上升至 0.98 J/%。说明 Q_{cs} 达较高水平后，继续提升分离效果将导致能耗成本大幅增加。综合分离效率与能耗考虑，6 Hz、15 mm 稳态正弦激励模式下薯土分离率较优，为 89.50%，单位分离比能为 0.32 J/%。

表 2　稳态正弦激励的试验结果

Tab. 2　Results of steady-state sine excitation experiments

频率/Hz	振幅/mm	激励时间/s	输入能量 E_{in}/J	土壤颗粒空间轨迹偏移量 S_t/cm	S_t 标准差/cm	薯土分离率 Q_{cs}/%	Q_{cs} 标准差/%	单位分离比能 E_{SR}/(J·%$^{-1}$)
3	10.0	5	1.60	62.37	1.28	27.01	0.56	0.06
3	12.5	5	2.50	66.28	0.36	32.15	1.19	0.08
3	15.0	5	3.60	70.40	2.15	52.00	1.33	0.07
6	10.0	5	12.80	77.56	2.70	65.31	2.31	0.20
6	12.5	5	26.99	90.00	3.85	78.00	1.75	0.35
6	15.0	5	28.78	105.30	4.36	89.50	2.49	0.32
9	10.0	5	43.17	116.99	2.29	89.37	1.55	0.48
9	12.5	5	67.45	121.03	3.52	97.80	2.18	0.69
9	15.0	5	97.12	130.50	5.15	99.50	2.43	0.98

表 3　稳态正弦激励作用下频率和 S_t、Q_{cs}、E_{SR} 相关性分析

Tab. 3　Significant analysis of effect of vibration frequency on S_t, Q_{cs} and E_{SR}

指标	变异来源	平方和	自由度	均方和	F	P
土壤颗粒空间轨迹偏移量 S_t	组间	4 813.204	2	2 406.602	28.063	<0.001 **
	组内	514.539	6	85.757		
	总和	5 327.743	8			
薯土分离率 Q_{cs}	组间	5 389.265	2	2 694.632	23.097	0.002 **
	组内	699.985	6	116.664		
	总和	6 089.250	8			
单位分离比能 E_{SR}	组间	6 508.454	2	3 254.227	14.382	0.005 **
	组内	1 357.627	6	226.271		
	总和	7 866.081	8			

4.2.2　线性扫频激励

当振幅为 15 mm、起始频率为 3 Hz 时，随着终止频率从 6 Hz 提升至 9 Hz，S_t 从 93.15 cm 增加至 104.85 cm（表 4），Q_{cs} 从 75.25% 提高至 76.75%，而 E_{SR} 从 0.15 J/% 上升至 0.37 J/%。结果说明拓展扫频范围与增大振幅均有助于提升整体扰动效果，对薯土分离具有促进作用。表 5 结果显示，扫频范围（终止频率）对 S_t 的影响不显著（$P=0.341$），但对 Q_{cs}（$P=0.049$）和 E_{SR}（$P=0.036$）影响显著，说明动态扫频过程中，分离效果与能耗主要受输入总能量的整体调控，土壤的瞬态位移幅值并非决定性因素。综合分离效率与能耗考虑，起始频率 3 Hz、终止频率 9 Hz、振幅 15 mm 线性扫频激励模式下薯土分离率较优，为 76.75%，E_{SR} 为 0.37 J/%。

4.2.3　对数扫频激励

振幅为 15 mm、起始频率为 3 Hz 时，随终止频率从 6 Hz 提升至 9 Hz，S_t 从 86.33 cm 增至 99.77 cm，

表 4 线性扫频激励与对数扫频激励试验结果

Tab. 4 Results of linear sweep frequency and logarithmic sweep frequency experiments

振动模式	起始频率/Hz	终止频率/Hz	振幅/mm	激励时间/s	输入能量 E_{in}/J	土壤颗粒空间轨迹偏移量 S_t/cm	S_t 标准差/cm	薯土分离率 Q_{cs}/%	Q_{cs} 标准差	单位分离比能 E_{SR}/(J·%$^{-1}$)
线性扫频激励	3	6	10.0	5	6.00	70.60	1.25	48.12	1.15	0.08
	3	6	12.5	5	9.37	80.84	1.78	55.08	2.43	0.12
	3	6	15.0	5	13.49	93.15	0.62	75.25	2.87	0.15
	3	9	10.0	5	15.99	74.68	1.38	58.69	1.64	0.18
	3	9	12.5	5	24.98	91.64	2.46	65.48	2.91	0.26
	3	9	15.0	5	35.96	104.85	1.58	76.75	3.12	0.37
	6	9	10.0	5	25.98	82.28	0.45	77.84	1.28	0.27
	6	9	12.5	5	40.60	103.50	2.05	88.90	1.57	0.41
	6	9	15.0	5	58.46	117.90	1.86	94.50	2.89	0.58
对数扫频激励	3	6	10.0	5	5.38	65.772	1.82	44.23	1.98	0.12
	3	6	12.5	5	8.41	75.924	2.61	51.75	2.24	0.16
	3	6	15.0	5	12.11	86.328	3.35	69.80	2.66	0.17
	3	9	10.0	5	12.61	71.316	2.21	54.38	2.45	0.22
	3	9	12.5	5	19.71	86.976	3.28	61.25	2.71	0.32
	3	9	15.0	5	28.38	99.774	4.24	71.16	2.89	0.40
	6	9	10.0	5	24.96	78.984	2.29	72.54	2.12	0.34
	6	9	12.5	5	39.00	98.478	3.41	83.92	0.38	0.46
	6	9	15.0	5	56.16	112.212	4.53	89.75	3.68	0.63

表 5 线性扫频和对数扫频激励作用下频率对 S_t、Q_{cs} 和 E_{SR} 相关性分析

Tab. 5 Significant analysis of frequency of linear and logarithmic sweep frequency for S_t, Q_{cs} and E_{SR}

振动模式	变异来源	平方和	自由度	均方和	F	P
线性扫频模式	S_t	组间	583.892	2	291.946	1.293
		组内	1 354.568	6	225.761	
		总和	1 938.459	8		
	Q_{cs}	组间	1 221.954	2	610.977	5.183
		组内	707.276	6	117.879	
		总和	1 929.230	8		
	E_{SR}	组间	1 386.254	2	693.127	6.113
		组内	680.311	6	113.385	
		总和	2 066.565	8		
对数扫频模式	S_t	组间	633.590	2	316.795	1.617
		组内	1 175.159	6	195.860	
		总和	1 808.749	8		
	Q_{cs}	组间	1 160.127	2	580.063	5.430
		组内	640.943	6	106.824	
		总和	1 801.070	8		
	E_{SR}	组间	1 590.584	2	795.292	8.349
		组内	571.513	6	95.252	
		总和	2 162.097	8		

Q_{cs}从 69.80% 提升至 71.16%，E_{SR}从 0.17 J/% 升高至 0.40 J/%。变化趋势与线性扫频相似，但 Q_{cs}随参数提升增幅有限，E_{SR}呈现快速上升，说明该模式下薯土分离率的提升伴随着能耗的急剧增加。方差分析可知，扫频范围（终止频率）对 S_t影响不显著（$P=0.274$），对 Q_{cs}（$P=0.045$）和 E_{SR}（$P=0.018$）影响显著。扫频激励模式下，分离效果与能耗主要受输入总能量的影响，土壤瞬态位移并非决定分离效率的核心因素。

综合考虑分离效率与能耗，起始频率 6 Hz、终止频率 9 Hz、振幅 12.5 mm 的对数扫频激励模式下薯土分离率较优，为 83.92%，E_{SR}为 0.46 J/%。

4.3 S_t与 Q_{cs}的相关性分析

S_t与 Q_{cs}在 3 种激励模式下均呈正相关关系，稳态正弦激励下，S_t与 Q_{cs}的相关系数最高（$r=0.943$），扫频激励下，S_t与 Q_{cs}仍保持正相关（线性扫频 $r=0.885$，对数扫频 $r=0.898$）。结果表明扫频激励中，频率的动态变化导致了更复杂的动力学环境，土壤运移包含更多与界面剥离非直接相关的运动成分，如颗粒间内部摩擦引起的能量耗散，从而削弱了宏观位移对分离效率的预测能力。

稳态正弦激励下，Q_{cs}与 E_{SR}随频率升高均呈线性增长趋势（$R^2\geqslant0.877$），说明频率是调控分离过程的主导因素。10 mm 和 12.5 mm 中低振幅下，Q_{cs}增长斜率高于 E_{SR}（图 7a 和图 7b），表明增大频率对分离效果的促进优于能耗增长，能量利用率较高。15 mm 高振幅下（图 7c），E_{SR}拟合曲线的斜率（15.12）高于 Q_{cs}的斜率（8.50），意味着继续增加振频将导致能耗增速远超分离率提升。

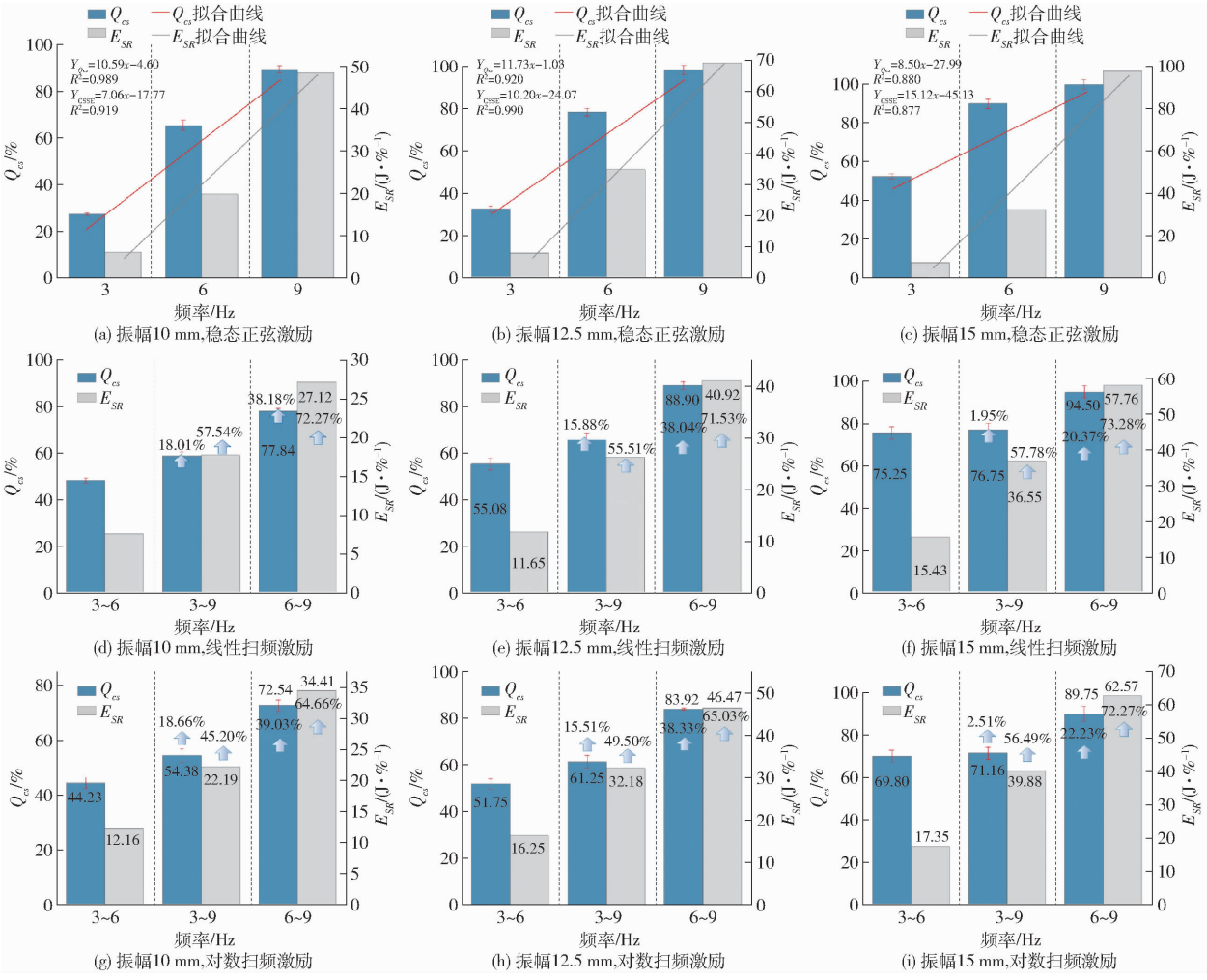

图 7　薯土分离率与分离比能对比分析

Fig. 7　Comparative analysis of cassava－soil separation rate and separation energy efficiency

在 10 mm(图 7d)、12.5 mm(图 7e)和 15 mm(图 7f)3 种振幅线性扫频激励下，E_{SR}增幅均远超Q_{cs}的增幅。尤其是在 15 mm 振幅下，扫频范围从 3～6 Hz 扩展至 3～9 Hz 时，Q_{cs}增幅仅 1.95%，而E_{SR}增幅高达 57.78%，均呈现出分离率提升有限而能耗急剧增长的共性特征。在 10 mm 振幅下，对数扫频范围从 3～6 Hz 扩展至 3～9 Hz 时，Q_{cs}增幅达 22.9%，E_{SR}增幅达 82.5%；12.5 mm 振幅下，扫频范围从 3～6 Hz 扩展至 3～9 Hz 时，Q_{cs}增幅为 18.4%，E_{SR}增幅为 98.0%，对数扫频激励表现出与线性扫频一致的能效变化趋势。

4.4　多模态振动下土壤空间运移特性

不同振动模式通过调控激励的频率特性[22]，可改变能量在土壤中的传递、耗散与颗粒响应方式，最终呈现出差异化的运移特征[23]。

3 种振动模态下各土层颗粒的运动轨迹呈现显著差异：上层土壤受机械约束弱，惯性运动主导，对振动模式不敏感，轨迹变化最小(图 8c)；中层土壤易受能量传递影响，变化明显(图 8d)；下层土壤紧邻振源，受直接约束最强，轨迹变化最显著(图 8e)。

稳态正弦激励(6 Hz，15 mm)模式下，下层土壤颗粒受强约束，能稳定跟随激励源做周期性振荡(图 8f)，表现出较高的动力协同性[24]。中层土壤位移具有累积现象，源于非均匀散体介质的波传播特性，导致了能量分布与运动响应的再分配[25]。上层土壤的不规则运动，是能量耗散和弱约束的共同作用结果[26]。

线性扫频和对数扫频激励(3～9 Hz，15 mm)模式下，下层土壤失去周期性(图 8g、8h)；中层土壤位移显著增加，激励频率扫过中层土壤的固有频率区间，引发共振并放大了位移响应[27]。上层土壤位移达到最大值，原因在于宽频激励下多频率成分的叠加效应，以及表层土壤在惯性力与重力共同作用下更易发生跳跃、碰撞等非线性行为[28－29]。微小的非线性差异可极大改变波在介质中的传播与能量分配，进而显著影响系统的动态响应，进一步说明了激励方式对系统动力协同性与能量传递效率具有关键调控作用[30－31]。

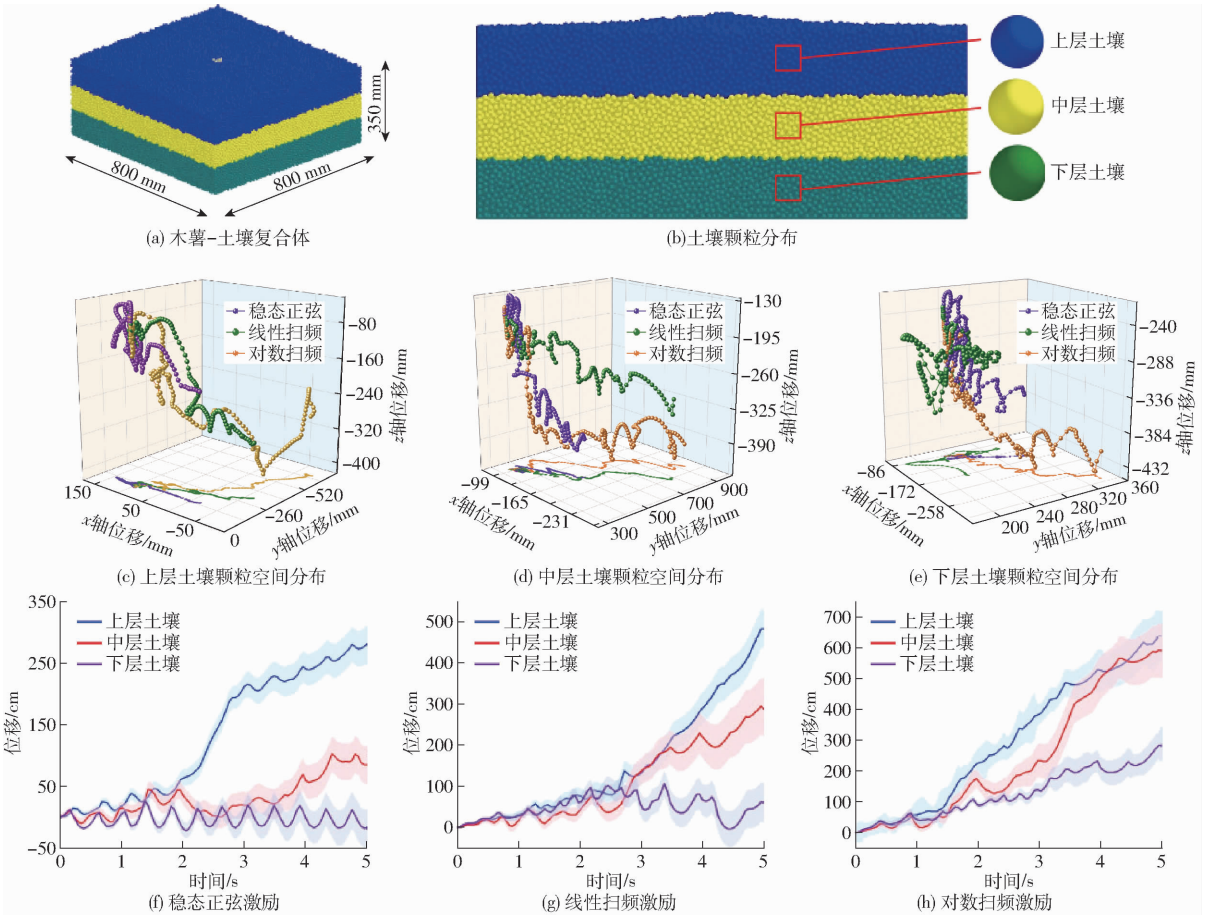

图 8 多模态振动下的土壤运移规律

Fig. 8 Soil migration characteristics under multimodal vibration

4.5 木薯-土壤分离验证结果

稳态正弦激励能量集中作用于单一频率,与复合体系统的固有频率接近或匹配时,易引起共振响应,实现能量高效传递与定向调控。线性与对数扫频的能量随频率连续变化而分布在一个较宽的频带内[32]。这种时变频谱特性使其难以在单一频率上形成持续的共振,这解释了扫频范围对瞬时土壤位移 S_t 的影响不显著的试验现象。

木薯块根表面形态不规则且与土壤紧密嵌合,导致夹缝区域的土壤处于强机械约束状态,如图 9 所示,此时界面黏附力大,常规振动产生的力学作用难以有效传递至这些微区,与块根表面粗糙度、土壤本身的含水率有关[33]。后续需开展多土壤类型、多水分梯度下的系统研究,并构建适应不同区域的振动参数推荐图谱,以推动振动收获技术向高效、节能、低损、环境友好的综合性目标发展。

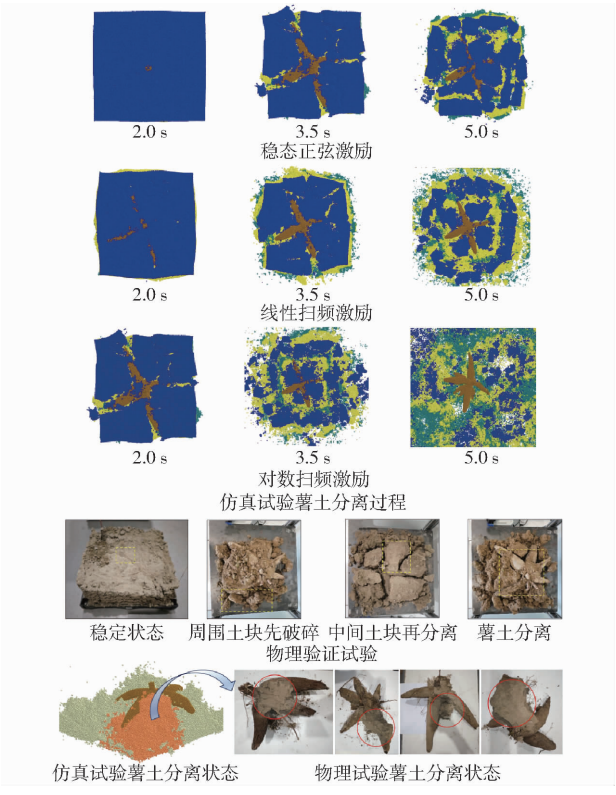

图 9 多模态振动下木薯-土壤分离台架验证

Fig. 9 Separation pattern of cassava and soil under multimodal vibration

5 结束语

本文构建了薯土复合体累积冲击能量耗散模型,成功建立并校准了高精度薯土复合体离散元模型,其中木薯压缩和土壤锥入的仿真与物理试验相对误差分别为 0.98% 与 0.21%,为多模态振动分离

仿真提供了可靠的模型基础。3 种振动模式下，振动频率对 S_t、Q_{cs} 及 E_{SR} 均表现出极显著影响（$P < 0.01$）。线性与对数扫频模式下，扫频范围对 S_t 的影响不显著，但对 Q_{cs} 与 E_{SR} 影响均显著，S_t 与 Q_{cs} 呈正相关关系，但相关性低于稳态正弦激励。研究确定了各振动模式下兼顾分离效率与能耗的较优作业参数组合：6 Hz、15 mm 稳态正弦激励模式下，薯土分离率较优，为 89.50%，单位分离比能为 0.32 J/%；起始频率 3 Hz、终止频率 9 Hz、振幅 15 mm 的线性扫频激励模式下，薯土分离率较优，为 76.75%，单位分离比能为 0.37 J/%；起始频率 6 Hz、终止频率 9 Hz、振幅 12.5 mm 的对数扫频激励模式下，薯土分离率较优，为 83.92%，单位分离比能为 0.46 J/%。研究完善了木薯-土壤-振动模态间的互作理论，为低能耗木薯收获装备开发提供了理论依据与参数指导。

参　考　文　献

[1] LONG S F, WEI W B, LI D F, et al. Study on separation of the tuber-soil binary mixture based on vibration and airflow coupling[J]. Biosystems Engineering, 2024, 239: 13 - 24.

[2] 肖茂华,钮约,汪开鑫,等. 自激振动旋耕刀设计与减扭降耗性能分析[J]. 农业机械学报,2022,53(11):52 - 63.
XIAO Maohua, NIU Yue, WANG Kaixin, et al. Design of self-excited vibrating rotary tiller and analysis of its performance in reducing torsion and consumption[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 52 - 63. (in Chinese)

[3] CHEN M D, HU P X, ZHU H R, et al. Construction and validation of the DEM - MBD coupling model of reuleaux triangular chain vibrating potato-soil separation interactions in hilly areas combine harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 238: 110882.

[4] GUAN C S, FU J J, XU L, et al. Study on the reduction of soil adhesion and tillage force of bionic cutter teeth in secondary soil crushing[J]. Biosystems Engineering, 2022, 213: 133 - 147.

[5] 柳才朝,顾满,吴峰,等. 马铃薯收获减损机理研究试验台设计与优化[J]. 农业机械学报,2026,57(3):228 - 238.
LIU Caichao, GU Man, WU Feng, et al. Design and optimization of test bench for studying mechanism of loss reduction in potato harvesting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(3): 228 - 238. (in Chinese)

[6] GAO G F, XIANG Y F, QIAO H, et al. Modeling on cutting force considering tool flank wear in ultrasonic vibration-assisted milling Ti3Al[J]. Wear, 2025, 566 - 567: 205761.

[7] 魏忠彩,苏国梁,李学强,等. 基于离散元的马铃薯收获机波浪形筛面参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(10):109 - 122.
WEI Zhongcai, SU Guoliang, LI Xueqiang, et al. Parameter optimization and test of potato harvester wavy sieve based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 109 - 122. (in Chinese)

[8] LIU W R, ZHANG G Z, WANG H C, et al. Microscopic deformation and fragmentation energy consumption characteristics of soils with various moisture contents using discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 241: 106131.

[9] RUYSSCHAERT G, POESEN J, VERSTRAETEN G, et al. Soil losses due to mechanized potato harvesting[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 86: 52 - 72.

[10] CHEN M D, LIU X T, HU P X, et al. Study on rotor vibration potato-soil separation device for potato harvester using DEM - MBD coupling simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 218: 108638.

[11] LONG J, YU Q G. Blocking effect of fault on overburden deformation and stress transfer based on stress wave theory[J]. Coal Engineering, 2022, 54(3): 105 - 111.

[12] 伍德林,赵恩龙,姜山,等. 基于能量传递规律的油茶树冠层振动参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(8):23 - 33.
WU Delin, ZHAO Enlong, JIANG Shan, et al. Optimization and experiment of canopy vibration parameters of *Camellia oleifera* based on energy transfer characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 23 - 33. (in Chinese)

[13] 牟向伟,陈林涛,马旭,等. 预切种振动供种式木薯播种器勺链排种机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(2):20 - 31.
MOU Xiangwei, CHEN Lintao, MA Xu, et al. Design and experiment of spoon chain seed metering mechanism of precutting vibration seed feeding cassava planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 20 - 31. (in Chinese)

[14] 刘婉茹,张国忠,刘浩蓬,等. 多子芋收获机离心回转式根土分离装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(21):14 - 26.
LIU Wanru, ZHANG Guozhong, LIU Haopeng, et al. Design and experiment of the centrifugal rotary root-soil separation device for a multiple taro harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(21): 14 - 26. (in Chinese)

[15] LONG S F, KANG S, XU S M, et al. Parameter optimization of vibration and crushing combination digging device based on soil-tuber breakage model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 230: 109861.

[16] ZHOU Y X, JI Y. Simulation and experimental study of coarse coal breakage based on Tavares UFRJ model in pneumatic

conveying[J]. Powder Technology, 2025, 464: 121216.
[17] ZHANG Q, WANG J F, LIU J X, et al. Instantaneous multi-frequency tracker for nonstationary vibration signal in mechanical system[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 203: 110695.
[18] JI C, LIU W R, DENG Y G, et al. Calibration of DEM parameters and microscopic deformation characteristics during compression process of lateritic soil with different moisture contents[J]. Agriculture, 2025, 15: 1548.
[19] 梁树建,刘立晶,刘芳建,等. 菠菜根土复合体离散元模型建立与标定试验[J]. 农业工程学报,2025,41(5):38 - 49.
LIANG Shujian, LIU Lijing, LIU Fangjian, et al. Establishment and calibration experiment of the discrete element model for spinach root-soil complex[J]. Transactions of the CSAE, 2025,41(5): 38 - 49. (in Chinese)
[20] WU Z Y, WANG X S, LIU D W, et al. Calibration of discrete element parameters and experimental verification for modelling subsurface soils[J]. Biosystems Engineering, 2021, 212: 215 - 227.
[21] LIU G Y, XIA J F, ZHENG K, et al. Effects of vibration parameters on the interfacial adhesion system between soil and metal surface[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 218: 105294.
[22] YU C L, WANG J G, ZHAO P C, et al. Low-frequency vibration energy harvesting using electret-piezoelectric complementary coupling with optimized bandwidth and power density[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 532: 146953.
[23] CHENG J, ZHENG K, XIA J F, et al. Effects of ultrasonic vibration-assisted cutting on tillage blade performance and soil fragmentation characteristics under different soil moisture contents[J]. Soil and Tillage Research, 2025, 252: 106575.
[24] MA X D, GUO B J, LI L L. Simulation and experiment study on segregation mechanism of rice from straws under horizontal vibration[J]. Biosystems Engineering, 2019, 186: 1 - 13.
[25] COSTA J C, BORGES J A R, PIRES L F. Soil bulk density evaluated by gamma-ray attenuation: analysis of system geometry [J]. Soil and Tillage Research, 2013, 129: 23 - 31.
[26] LI T, SHU J J, LI Y, et al. Wave propagation characteristics of fluid-containing soil granular materials at different frequencies under multiple dissipation mechanisms: a case study on calcareous sand in the South China Sea[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 174: 106621.
[27] LIU H F, ZHAO L Y, CHANG Y L, et al. Design and characteristic analysis of magnetostrictive bistable vibration harvester with displacement amplification mechanism[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 243: 114361.
[28] JIA N, ZHANG H Y, BO J C, et al. Study on walnut dynamic response to different excitations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 236: 110432.
[29] MACNIDER B, XIU H, TAMUR C, et al. Customizable wave tailoring nonlinear materials enabled by bilevel inverse design [J]. Nature Communications, 2025, 16: 3425.
[30] PANG J, LI Y M, JI J T, et al. Vibration excitation identification and control of the cutter of a combine harvester using triaxial accelerometers and partial coherence sorting[J]. Biosystems Engineering, 2019, 185: 25 - 34.
[31] LAU J A, CHEN L, CHOUDHURY A, et al. Transporting and concentrating vibrational energy to promote isomerization[J]. Nature, 2021, 589: 391 - 395.
[32] XU T L, LI Y G, ZHANG C, et al. Low frequency band gap prediction and broadband vibration reduction of multi-scale elastic metabeams with particle damping[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 235: 112929.
[33] DU J, HENG Y F, ZHENG K, et al. Investigation of the burial and mixing performance of a rotary tiller using discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220: 105349.

(上接第 26 页)

[24] 王颖,李建桥,邹猛,等. 仿生锥形触土部件水平阻力研究[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊 1):124 - 129.
WANG Ying, LI Jianqiao, ZOU Meng, et al. Research on drag force for bionic cone soil contact part[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(Supp. 1):124 - 129. (in Chinese)
[25] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 六版. 北京:机械工业出版社,2018.
[26] 刘正铎. 机械臂式甘薯移栽机关键技术与移栽机理研究[D]. 泰安:山东农业大学,2022.
LIU Zhengduo. Key technology and transplanting mechanism of sweet potato transplanter with mechanical arm[D]. Taian: Shandong Agricultural University,2022. (in Chinese)
[27] 孔德航,张学东,崔巍,等. 基于模糊 PID 的顶夹式取苗装置苗盘定位控制方法[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊 1): 207 - 216,229.
KONG Dehang, ZHANG Xuedong, CUI Wei, et al. Control method for seedling tray positioning in top-clamping seedling-taking device based on fuzzy PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(Supp. 1):207 - 216, 229. (in Chinese)